



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA 'LUIZ DE QUEIROZ'
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM
IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE
PROFESSOR: JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE COM APLICAÇÃO INTERMITENTE DE ÁGUA

Tales Miler Soares
Márcio Aurélio Lins dos Santos
Rodrigo Alessandro de Lima Corrêa

Piracicaba – SP, 05 de novembro de 2002.

SUMÁRIO

1. Introdução	3
2. Princípios da Irrigação com Aplicação Intermitente de Água	5
3. Mecanismos que Causam a Redução da Taxa de Infiltração na Aplicação Intermitente de Água.....	6
4. Fase de Avanço na Irrigação com Aplicação Intermitente	7
5. Infiltração da Água no Solo na Irrigação Intermitente.....	16
7. Referências Bibliográficas.....	28

IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE COM APLICAÇÃO INTERMITENTE DE ÁGUA¹

Márcio Aurélio Lins dos Santos²
Rodrigo Alessandro de Lima Corrêa²
Tales Miler Soares²

1. INTRODUÇÃO

A irrigação quase sempre é apresentada como a técnica para o significativo aumento da produção de alimentos, uma vez que a taxa de crescimento populacional é superior à taxa de oferta de alimentos. Aliada a essa característica mais nobre tem-se outras importantes perspectivas quando se adota a irrigação, sejam: possibilidade de produção na entressafra com aumento da lucratividade; possibilidade de produção de alimentos de melhor qualidade; possibilidade de otimização dos demais fatores de produção etc.

Dentre os diversos métodos, a irrigação por superfície é o mais antigo e o mais empregado método de irrigação no mundo. No Brasil, corresponde à 60% da área irrigada, sendo utilizada principalmente na rizicultura através da inundação. Em outras regiões, como no Nordeste, a irrigação por superfície é praticada através de sulcos, na fruticultura e em cultivos de subsistência. Todavia, o principal problema deste método é, geralmente, sua baixa eficiência. Perdas por percolação profunda, lâmina muito desigual ao longo da parcela e variabilidade espacial do solo são basicamente os responsáveis pela baixa eficiência de aplicação, que varia de 40 a 75% (Marouelli e Silva, 1998). Entretanto, quando bem dimensionada e bem manejada, a irrigação por superfície pode permitir valores elevados de eficiência de aplicação, reduzindo a diferença existente, quando comparada com outros métodos de irrigação, sendo importante aliada na economia de energia, pois é o método que apresenta o menor consumo de energia (Marouelli e Silva, 1998).

¹ Monografia apresentada na Disciplina “Irrigação por Superfície” do Curso de Pós Graduação em Irrigação e Drenagem ESALQ/USP

² Eng. Agr. Pós Graduando em Irrigação e Drenagem, Bolsista CAPES – ESALQ/USP

Uma maneira de se aumentar a eficiência na irrigação por superfície é a utilização do manejo com redução de vazão, que visa reduzir a vazão aplicada no início da área depois de completada a fase de avanço. Outra alternativa apresentada por Stringham e Keller em 1979 é o conceito de vazão intermitente (“surge flow”), que consiste em aplicar e interromper a aplicação da água de irrigação por períodos de duração constante ou variável, até que a infiltração acumulada seja a desejada (Testezlaf, 1986). Este conceito já era conhecido pelos agricultores a mais de duas décadas antes dos primeiros estudos. Eles haviam descoberto que desviando o fluxo para outros sulcos durante algum tempo enquanto o avanço se detinha e retornando mais tarde o fluxo ao campo, já parcialmente molhado, a fase de avanço podia ser completada (Camacho e Levien, 2001). De 1979 até o presente momento, vários trabalhos foram realizados em diversos países do mundo, comprovando que a prática promove uma redução no tempo de avanço com redução no volume de água gasto para completar uma irrigação, reduzindo as perdas por percolação e conseqüente aumento da eficiência.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar os conceitos da prática da irrigação por superfície com aplicação intermitente, apresentando resultados que comprovam o aumento da eficiência da irrigação, e também como ocorre o processo de infiltração da água nessas condições, os mecanismos que reduzem a infiltração e como os modelos devem considerar os parâmetros de infiltração na irrigação intermitente.

2. PRINCÍPIOS DA IRRIGAÇÃO COM APLICAÇÃO INTERMITENTE DE ÁGUA

A irrigação com aplicação intermitente de água compreendem diversas irrigações incompletas denominadas ciclos, em que a fase de avanço continua após o corte da água na seção de aplicação e, muitas vezes, durante as fases de depleção e recessão (Wallender e Rayej, 1985). Denomina-se tempo cíclico o tempo necessário para se completar um ciclo, ou seja, o tempo entre o início de um pulso e o início do pulso subsequente. De acordo com Bishop et al. (1981), o tempo cíclico pode variar de alguns segundos até horas, devendo, porém, estar entre 10 e 60 min. A taxa cíclica é definida como sendo a razão entre o tempo de aplicação e o tempo cíclico. Um importante efeito da aplicação intermitente é que à frente de avanço de um determinado pulso move mais rapidamente do que a do pulso antecedente, fazendo com que, quando os intervalos entre aplicações sucessivas forem muito curtos, as frentes de avanço se encontrem a alguma distância ao longo do sulco. O termo escoamento intermitente é conceitualmente correto quando os intervalos de tempo entre pulsos são grandes o suficiente para que as frentes de avanço não se interajam.

A irrigação com aplicação intermitente de água têm um grande potencial para aumentar a uniformidade de aplicação de água da irrigação por superfície por causa do aumento da velocidade de avanço, que leva à diminuição da diferença entre os tempos de oportunidade de infiltração ao longo da parcela, e também pelo decréscimo da taxa de infiltração no início dos sulcos ou das faixas, para compensar o maior tempo de oportunidade de infiltração (Kemper et al., 1988).

Coolidge et al. (1982) destacaram duas vantagens práticas encontradas na aplicação intermitente: a variação do tempo de aplicação permite projetar o sistema, prevendo a redução da vazão média depois que se completou a fase de avanço, podendo, dessa maneira, reduzir as perdas por escoamento superficial; é observado que, para o mesmo volume de água aplicado, a frente de avanço se movimenta a uma distância maior ao longo do sulco do que no tratamento com aplicação contínua.

3. MECANISMOS QUE CAUSAM A REDUÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO NA APLICAÇÃO INTERMITENTE DE ÁGUA

Segundo Walker e Skogerboe (1984), o escoamento intermitente reduz significativamente a infiltração de água nos sulcos, provavelmente devido ao desenvolvimento acelerado de uma pequena camada superficial de partículas mais finas de solo, criada pelo movimento da água. Durante o período de drenagem, o aumento gradativo das pressões negativas consolida essa fina camada, reduzindo a permeabilidade do solo. Pela redução das taxas de infiltração a duração da fase de avanço diminui, melhorando o desempenho do sistema.

Samani et al. (1985) afirmam que são dois os fenômenos básicos que afetam a infiltração da água num pulso subsequente ao período em que a mesma não é aplicada: a redistribuição da água infiltrada no perfil do solo e o selamento parcial da superfície do solo molhado. A redistribuição é causada pelo efeito das forças gravitacional e capilar agindo sobre a água que foi aplicada. O segundo fenômeno, que ocorre nos intervalos entre aplicações de água, consiste na consolidação do solo previamente molhado pelo desenvolvimento da pressão negativa no solo. Esse processo de consolidação ocorre quando os agregados do solo são enfraquecidos ou parcialmente destruídos ao perderem a umidade.

Samani et al. (1985) também concluíram, após estudos realizados em solos franco-arenosos, franco-siltosos, franco-argilo-siltosos e franco, que a aplicação intermitente de água faz aumentar a quantidade de água infiltrada no solo se a massa específica não aumentar o suficiente nos intervalos em que a água não é aplicada. Se essa aumentar significativamente devido à consolidação da superfície do solo e se essa mudança for grande o suficiente para sobrepor o efeito do aumento do gradiente hidráulico durante o mesmo período, então a aplicação intermitente de água reduz a infiltração instantânea. A consolidação da superfície do solo depende da magnitude da pressão negativa desenvolvida e das propriedades do solo antes da irrigação, tais como: estrutura, textura, teor de matéria orgânica, massa específica e grau de saturação. Concluíram também que se aumentando o tempo em que a água não é aplicada no sulco há maior redução da velocidade de infiltração durante certo tempo.

Malano, citado por Samani et al. (1985), concluíram nos seus estudos que a aplicação intermitente tem maior efeito na redução da velocidade de infiltração da água no solo durante a primeira irrigação. Concluiu também que a intermitência é capaz de aumentar o valor da velocidade de infiltração básica se o gradiente hidráulico for grande o suficiente para tal.

4. FASE DE AVANÇO NA IRRIGAÇÃO COM APLICAÇÃO INTERMITENTE

Considerável atenção tem sido dada à fase de avanço na irrigação por superfície, por causa de sua importância sobre o tempo de oportunidade de infiltração ao longo da parcela irrigada. Por isso, tanto o projeto como o manejo dessa modalidade de irrigação objetiva tornar a fase de avanço o mais rápido possível, evitando grande perda por percolação no início da parcela, além de diminuir as diferenças entre os tempos de oportunidade de infiltração ao longo da mesma (Bishop et al., 1981).

Em testes realizados por Stringham e Keller, foi verificado que a fase de avanço em sulcos irrigados com aplicação intermitente foi mais rápida do que naqueles com aplicação contínua. Ao usarem uma vazão de 0,6 l/s para sulcos com comprimento de 180 m, o tempo de avanço médio para a aplicação intermitente foi de 130 min, enquanto para aplicação contínua excedeu 400 min (Testezlaf, 1986). Essa redução no tempo de avanço interfere diretamente no volume de água utilizado na irrigação, sendo que neste trabalho, alcançou-se uma economia de 33% em um dos ensaios. Em trabalhos realizados por Coolidge et al. (1982) num solo franco-siltoso com sulcos de 100 m de comprimento, com declividade média de 1% e vazão de 0,30 l/s, foram verificados que, para um tempo efetivo de aplicação de 50 minutos na irrigação com aplicação intermitente, a fase de avanço foi completada com 50% a menos do volume de água usado com aplicação contínua, quando se utilizou um tempo cíclico de 20 min e uma taxa cíclica de 0,5.

Entretanto, nos sistemas onde o tempo de aplicação é muito baixo, verifica-se que o avanço não ultrapassa uma determinada distância. Uma possível explicação para este fato é o fenômeno chamado de “Requerimento de Armazenamento

Inativo”. Durante o período em que a água é aplicada ela infiltra, preenche as áreas de armazenamento e a seção transversal do sulco ao mesmo tempo em que ela avança. Quando é cessada a aplicação da água, a infiltração continua a processar-se e a seção transversal dos sulcos é esvaziada. Na aplicação do próximo pulso, a água deve novamente preencher as zonas de acumulação da superfície, causadas pela rugosidade, e pela irregularidade dos sulcos antes que o escoamento possa avançar sobre o trecho seco. O “Requerimento de Armazenamento Inativo” é dependente da rugosidade, da declividade, do comprimento e da geometria do sulco (Azevedo, 1989; Pereira, 1991).

Este fenômeno foi observado por Coolidge et al. (1982), pois nos tratamentos com aplicação de água por 5 min e corte por 5 e 10 min, o avanço cessava entre as distâncias de 65 e 100 m. Com isso percebe-se que existe uma relação entre o tempo de aplicação e o máximo comprimento do sulco para uma determinada vazão, concluindo que o tempo de aplicação de água em cada ciclo deve ser otimizado. Se muito pequeno, o avanço não ultrapassa uma determinada distância, se muito longo, o escoamento intermitente começa a perder suas características, assemelhando-se ao escoamento contínuo em extensas partes do sulco.

Os mesmos autores trabalharam no solo do experimento anteriormente citado, com a mesma vazão, para os tempos cíclicos de 10, 20 e 40 min, com taxas cíclicas de 0,25, 0,50 e 0,75. Alguns tratamentos foram também testados sete dias após a realização da primeira irrigação, para se estudar o efeito da intermitência sobre a segunda irrigação. Testou-se também o escoamento contínuo para a mesma vazão (18 l/min). Trabalhou-se, assim, com 10 tratamentos, efetuando-se duas repetições por tratamento. Os sulcos foram operados isoladamente, medindo-se novamente os tempos de avanço e recessão para cada pulso, assim como o escoamento superficial no final da área. Os autores concluíram que, para a primeira irrigação, durante um pulso de 20 min, a uma taxa cíclica de 0,5, o final dos sulcos foi alcançado em pouco mais de quatro pulsos completos (tempo total de 83 min). Para o tratamento contínuo, o avanço foi completado com 108 min. Desde que o tempo total de aplicação de água para o escoamento intermitente foi de 43 min, o avanço foi concluído com menos de 50% do volume de água necessário para o tratamento contínuo.

Izuno et al. (1985a), trabalhando com sulcos de 525 m e declividade de 0,6%

em um solo silte-argiloso e em um arenoso, verificaram que em todos os testes foi requerido menos tempo para se completar a fase de avanço para a aplicação intermitente do que para aplicação contínua, quando a mesma vazão de entrada foi usada. Verificaram também que o aumento na velocidade de avanço foi mais evidente no solo de textura leve, e concluíram que a irrigação com aplicação contínua necessitou de 1,6 a 3,6 vezes mais água para se completar a fase de avanço, quando comparada com a aplicação intermitente, nas condições estudadas.

Goldhamer et al. (1987), estudando o avanço da água em sulcos em um solo arenoso e em um argiloso, acrescentaram que os dados de avanço e de recessão para o solo arenoso mostraram que a água se movimenta rapidamente sobre a superfície umedecida pelo pulso anterior, caindo drasticamente quando atinge a porção seca.

Em outro experimento, Izuno et al. (1985) trabalharam num solo franco-argilo-siltoso, irrigando milho, nos anos de 1982 e 1983. Os sulcos, espaçados de 0,76 m e declividade de 0,006 m/m, tinham 525 m de comprimento em 1982 e foram reduzidos a 400 m, em 1983. Os tempos de avanço foram medidos em três sulcos para cada irrigação, em intervalos de 25 m. Instalaram-se infiltrômetros de sulco em cada parcela, a uma distância de 50 m da entrada dos sulcos, um dia antes de cada irrigação. Concluiu-se que, embora os valores de velocidade de infiltração básica para os escoamentos contínuo e intermitente tenham sido numericamente equivalentes, houve queda brusca nesse valor após a recessão do primeiro pulso. Esse fato acarretou em menores volumes de água requeridos para a finalização da fase de avanço quando se aplicou a água de modo intermitente. O fenômeno da redução da infiltração, devido ao escoamento intermitente, pareceu não sofrer efeito aditivo com a aplicação dos pulsos subseqüentes nem ser acumulativo com irrigações sucessivas em uma estação. A irrigação com aplicação intermitente também reduziu as diferenças nos tempos de avanço existentes entre as repetições de cada teste.

Estudando as características de avanço de água em sulcos com aplicação de água contínua e intermitentemente, utilizando vazões de 0,6, 0,9 e 1,2 l/s para um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso e vazões de 0,6, 1,1 e 1,6 l/s para um Aluvial Eutrófico Siltoso, Zanon et al. (1993) concluíram que, na condição de primeira irrigação, para um tempo cíclico de 60 min e em todas as vazões estudadas, a frente

de avanço chegou ao final do sulco com menor tempo, quando comparada aos tempos cíclicos de 20 e 40 min para o Latossolo. Entretanto, analisando o solo Aluvial Eutrófico, o efeito da aplicação intermitente não foi observado em nenhum dos tratamentos estudados. Para esse solo, o tratamento que proporcionou melhor efeito da aplicação intermitente foi aquele que utilizou tempo cíclico de 40 min para uma vazão de 0,6 l/s.

Bishop et al. (1981) trabalharam com vazões de 0,63, 1,26 e 1,89 l/s, com taxas cíclicas de 1, para 0,63 l/s, 0,5, para 1,26 l/s e 0,33, para 1,89 l/s, aplicando em cada sulco uma vazão média de 0,63 l/s, com tempo cíclico de 10 min, em um solo franco-siltoso cultivado com milho. Os sulcos foram construídos com uma declividade de 1,46%, 183 m de comprimento e dotados da mesma rugosidade e secção transversal. A água foi aplicada em sulcos casualizados registrando-se o tempo em que a frente de avanço atingia várias distâncias a partir do início dos sulcos. Mediu-se o escoamento superficial, de forma que a infiltração pudesse ser determinada a partir dos dados de entrada e saída de água nos sulcos, assumindo-se que a variabilidade espacial do solo era desprezível. Concluiu-se que os efeitos da irrigação intermitente foram mais acentuados durante a primeira irrigação quando as características de infiltração de água eram extremas. Encontrou-se diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, para os tempos de avanço entre os tratamentos contínuo e intermitente, embora as diferenças entre os tratamentos intermitentes não tenham sido notadas. Para a segunda irrigação, os resultados mostraram que as vantagens do escoamento intermitente foram substancialmente reduzidas. Esta redução também foi observada por Azevedo (1989) e Pereira (1991) na realização da segunda irrigação, comprovando que a primeira irrigação é a mais crítica no que se refere ao avanço da água nos sulcos (Figura 1 e Tabela 1). A Tabela 1, proveniente do ensaio realizado por Pereira (1991) comprova que o escoamento da água ao longo dos sulcos altera suas características geométricas, principalmente causando uma diminuição na profundidade máxima, devido ao assoreamento de parte dos taludes dos sulcos, dotando os sulcos de uma forma aproximadamente parabólica após a primeira irrigação, ao invés de permanecer a forma triangular anteriormente existente. Observa-se ainda que esta alteração é maior na primeira irrigação.

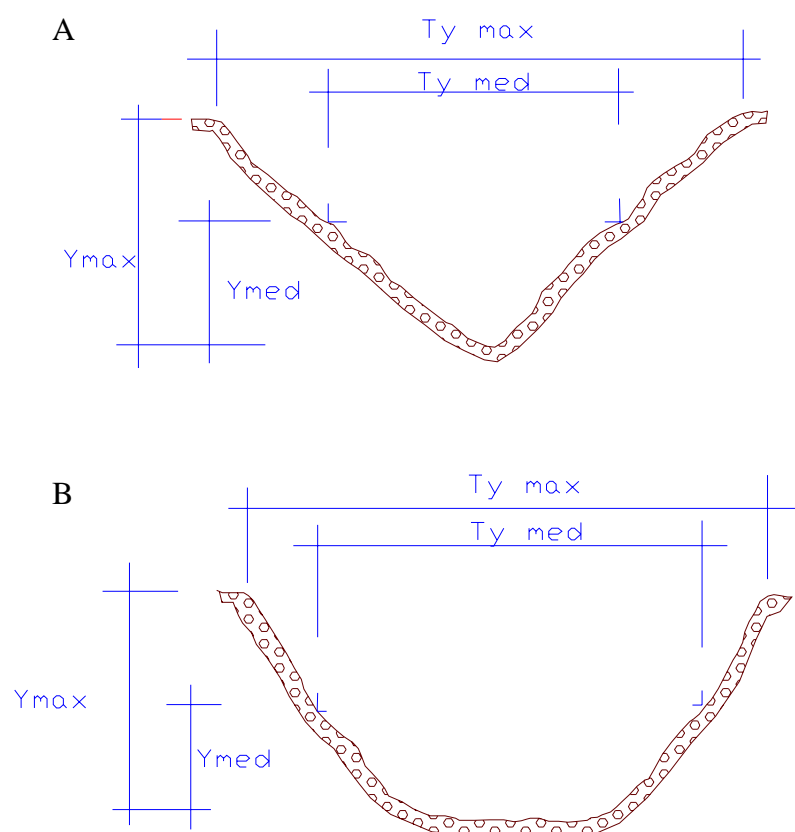


Figura 1. Secções transversais típicas de um sulco antes (A) e após (B) a primeira irrigação.

Tabela 1. Características geométricas médias da secção transversal dos sulcos, para a vazão de 0,80 l/s, antes e após a primeira, segunda e terceira irrigações.

	Primeira irrigação		Segunda irrigação	Terceira irrigação
	Antes (cm)	Após (cm)	(cm)	(cm)
Y máx	11,6	10,1	9,7	9,1
Y méd	5,8	5,0	4,8	4,5
Ty máx	44,0	40,9	39,2	39,4
Ty méd	28,0	24,2	24,0	24,5
Pm máx	52,5	47,8	45,8	45,8
Pm méd	33,2	27,4	26,9	27,1

Fonte: Pereira (1991)

Na mesma área descrita anteriormente por Bishop et al. (1981), foram estudadas a vazão de 1,26 l/s para os tempos cíclicos de 2, 5, 10 e 20 min, com taxa cíclica de 0,5, resultando numa vazão média de 0,63 l/s. Novamente observou-se que os efeitos da intermitência foram mais pronunciados na primeira irrigação quando o tempo de avanço, sob as condições do escoamento intermitente, foi quatro vezes menor que aquele apresentado pelo escoamento contínuo. Os resultados levaram a crer que, introduzindo uma certa quantidade de água no sulco e deixando que ela entrasse em recessão e infiltrasse antes da aplicação do próximo pulso, haveria uma alteração significativa na infiltração da água no solo. Observou-se também que, entre as repetições, os tempos de avanço variaram muito mais entre si para o escoamento contínuo que para o intermitente.

Em sulcos com 0,6% de declividade num latossolo vermelho escuro álico, Pereira (1991) verificou que para uma vazão de 0,80 l/s os tempos de avanço no escoamento intermitente foram 37 e 38% menores, respectivamente para os tempos cíclicos de 40 e 60 min, quando comparados com o escoamento contínuo (Tabela 2). Observa-se que na segunda irrigação houve redução significativa dos tempos com relação a primeira irrigação. Já na terceira irrigação percebe-se pequenas diferenças em relação à segunda, comprovando que a partir da terceira irrigação as características de infiltração da água no solo permanecem praticamente constantes, quer para o escoamento contínuo ou intermitente. Essas reduções no avanço propiciaram economia da água aplicada de até 30% para a vazão de 0,8 l/s no tempo cíclico de 40 min na segunda irrigação.

Tabela 2. Tempos e volumes gastos para finalização da fase de avanço, em três irrigações consecutivas, no escoamento contínuo e intermitente.

Irrigação	Vazão	Escoamento contínuo		Escoamento intermitente			
		Tempo (min)	Volume (l)	Tempo cíclico 40 min		Tempo cíclico 60 min	
	(l/s)			Tempo (min)	Volume (l)	Tempo (min)	Volume (l)
1	0,80	120	5760	76	3648	74	3552
	1,20	40	2880	38	2736	40	2880
2	0,80	78	3744	54	2592	60	2880
	1,20	30	2160	31	2232	30	2160
3	0,80	75	3600	58	2784	60	2880
	1,20	30	2160	*	*	30	2160

* Tratamento não testado devido a problema no bombeamento. Fonte: Pereira (1991)

As curvas de avanço na irrigação intermitente apresentam uma trajetória em forma de “faca”, nos pulsos ocorridos antes da água atingir o final dos sulcos. Essa forma ocorre devido a água escoar rapidamente sobre o solo molhado por pulsos prévios, tendo seu escoamento retardado assim que o solo seco é encontrado. Essa forma foi verificada por Pereira (1991) em seu experimento (Figura 2). Se a trajetória do avanço para o escoamento contínuo apenas tocar as bordas da “faca” do escoamento intermitente, se tem completada a fase de avanço com 50 % de economia de água do escoamento intermitente em relação ao contínuo, isso porque a taxa cíclica é de 0,5.

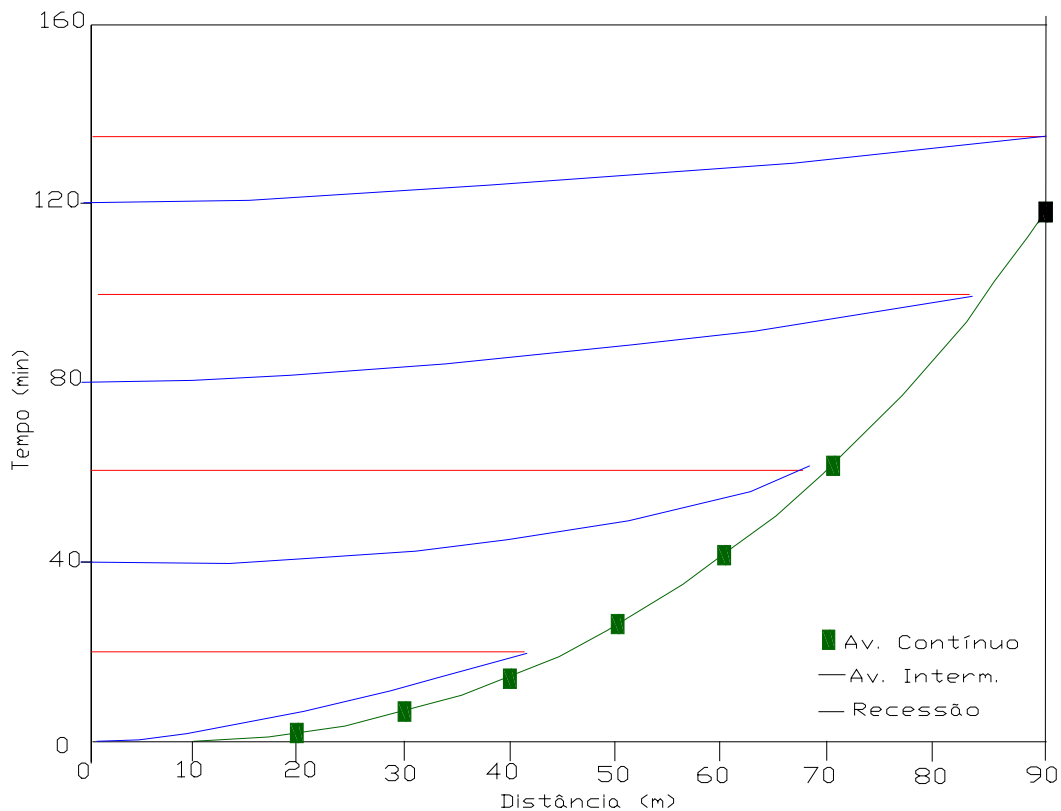


Figura 2. Curvas de avanço e recessão para quatro pulsos para o escoamento intermitente com tempo cíclico de 40 min e curva de avanço para o escoamento contínuo, para a vazão de 0,80 l/s, na primeira irrigação

Os mesmos resultados encontrados nos trabalhos anteriormente citados não foram encontrados por Azevedo (1989), que verificou que os tempos de avanço para o escoamento contínuo foi menor em relação ao escoamento intermitente em todas as vazões testadas, com taxa cíclica de 0,5, nos sulcos construídos em um solo aluvial eutrófico com declividade de 0,81% (Tabela 3). A justificativa para tal fato baseia-se na hipótese de que o selamento da superfície do solo, com a aplicação dos pulsos, sobre a capacidade de infiltração foi inferior ao efeito causado pelo aumento do gradiente hidráulico durante os intervalos de tempo em que a água não era aplicada, conforme Samani et al. (1985). Esse fato é reforçado pelos valores de velocidade de infiltração básica, que se encontraram maiores nas condições de fluxo intermitente. Além disso, verificou-se que o tempo cíclico de 60 min proporcionou menores tempos de avanço em relação aqueles testados para o tempo cíclico de 30 min. Este fato foi atribuído ao “Requerimento de Armazenamento Inativo”.

Uma forma de compreender melhor o efeito do selamento da superfície do solo causado pelo fluxo intermitente seria o acompanhamento da variação na distribuição do diâmetro dos poros da camada superficial do solo, antes e após cada irrigação.

Tabela 3. Tempos e volumes de água gastos para finalização da fase de avanço, na primeira irrigação, no escoamento contínuo e intermitente.

Vazão	Escoamento contínuo		Escoamento intermitente			
			Tempo cíclico 60 min		Tempo cíclico 30 min	
	Tempo (min)	Volume (l)	Tempo (min)	Volume (l)	Tempo (min)	Volume (l)
0,65 (l/s)	133	5187	172	6708	*	*
1,30	42	3276	78	6084	105	8190
1,95	20	2340	22	2574	54	6318

* A água não atingiu o final do sulco

Fonte: Azevedo (1989)

Segundo Elliott e Walker (1982), a equação que proporciona o melhor ajuste para os dados de avanço no campo sob condição de primeira irrigação é a seguinte:

$$X = \beta \cdot T^\alpha \quad (1)$$

em que:

X - distância, L;

T - tempo de avanço, T;

β e α - parâmetros empíricos.

Os parâmetros β e α podem ser determinados utilizando os pontos correspondentes à metade do comprimento do sulco (L_{med}) e o comprimento total do sulco (L_{max}), utilizando a metodologia dos dois pontos. Resolvendo o sistema de equações para as duas condições, tem-se:

$$\alpha = \frac{\ln(L_{max}) - \ln(L_{med})}{\ln(Ta_{max}) - \ln(Ta_{med})} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{L_{max}}{Ta_{max}^\alpha} \quad (3)$$

em que:

Ta_{max} - tempo de avanço para o comprimento L_{max} , min;

Ta_{med} - tempo de avanço para o comprimento L_{med} , min.

Para condição de irrigação com aplicação intermitente, McCornick et al. (1988) não verificaram um bom ajuste da equação 1 utilizando a metodologia dos dois pontos, porque a porção inicial do sulco já se encontra umedecida pelo pulso anterior, fazendo com que haja um maior efeito da variabilidade da infiltração de água no solo. Relatam ainda que, na maioria dos casos estudados, a velocidade de avanço referente ao segundo e aos subseqüentes pulsos tende a decrescer antes que a água se aproxime da porção seca do sulco, possivelmente em virtude da presença da zona de transição entre a seção molhada e aquela ainda seca, na qual a velocidade de infiltração está ainda parcialmente reduzida pelo primeiro pulso. Dessas observações, concluíram que a curva de avanço intermitente, tanto para a seção seca quanto para a úmida, poderia ser representada por três funções lineares distintas: a primeira, partindo de zero até o ponto onde a frente de avanço começa a desacelerar; a segunda, partindo deste ponto até onde começa a porção seca do sulco; e a terceira, partindo desse último ponto até o final da frente de avanço.

5. INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO NA IRRIGAÇÃO INTERMITENTE

A infiltração de água no solo é um processo físico muito complexo, de difícil caracterização, devido às condições **anisotrópicas** e heterogêneas comumente encontradas no solo. Por isso, extensivos estudos têm sido conduzidos a fim de melhor conhecer o processo de infiltração sob aplicação contínua de água no solo. Entretanto, poucos trabalhos são realizados com relação à aplicação intermitente de água (Samani et al., 1985). A irrigação por superfície e, principalmente, por sulcos, é um fenômeno complexo, principalmente em razão de o solo ser um meio não-uniforme sobre o qual a água é transportada. Com a utilização da aplicação intermitente de água, esse fenômeno é ainda mais complicado, em razão das várias fases de avanço e também do efeito alternado de molhamento e dessorção nas características de infiltração do solo.

Walker e Humpherys (1983) comentaram que o molhamento intermitente da superfície do solo altera a sua condutividade hidráulica, fazendo com que a infiltração não fique dependente só do tempo de oportunidade de infiltração, mas também da distância percorrida pela frente de umedecimento no solo.

Izuno et al. (1985) mediram a velocidade de avanço da água sob condição de intermitência e verificaram que, a partir do segundo pulso, essa velocidade variou muito pouco ao longo da distância molhada e que as curvas se mostraram praticamente lineares e paralelas. Isso indica que a mudança na taxa de infiltração ocorre após um pulso completo, durante uma aplicação intermitente. A existência dessa transição no regime de infiltração pode ser explicada considerando o perímetro molhado nos sulcos. Segundo os autores, uma das características da aplicação intermitente é que, durante o período desligado, o avanço continua ao longo do sulco, seguido da fase de recessão. Entretanto, o avanço ocorre com uma lâmina de água cada vez menor quando comparado com aquela lâmina normal de escoamento, o que corresponde a um menor perímetro molhado e a um menor gradiente, resultando em uma menor infiltração. Os mesmos autores afirmaram ainda que, mediante as curvas de avanço de uma irrigação com aplicação intermitente, parece haver três diferentes regimes de infiltração, considerando-se uma dada seção num determinado tempo: a infiltração na seção ainda não molhada do sulco, que pode ser caracterizada como altamente dependente do tempo,

semelhante à irrigação com aplicação contínua; uma transição no regime de infiltração ocorrida na porção do sulco já umedecida pelo primeiro; e, finalmente, as seções do sulco molhadas no mínimo duas vezes, onde a infiltração é bastante reduzida e independente do tempo.

As equações mais comuns para representação da velocidade de infiltração de água no solo são as empíricas, dentre elas destacam-se as equações de Kostiakov (equação 4) e Kostiakov-Lewis (equação 5):

$$Z = k \cdot t^a \quad (4)$$

$$Z = k \cdot t^a + Vib \cdot t \quad (5)$$

em que:

Z - infiltração acumulada, $L^3 L^{-1}$

T - tempo de infiltração, T;

k - parâmetro de ajuste, $L^3 \cdot T^{-a}$;

a - parâmetro de ajuste, adimensional;

Vib - velocidade de infiltração básica, $L^3 T^{-1} L^{-1}$.

Izuno et al. (1985) afirmaram que a velocidade de infiltração de água no solo, durante o primeiro período de tempo ligado na irrigação com aplicação intermitente de água, pode ser muito bem representada pela equação de Kostiakov. Porém, para os outros períodos de tempo ligado, a velocidade de infiltração poderia ser caracterizada por uma função linear.

Wallender e Rayej (1985) sugeriram duas equações de infiltração para a irrigação com aplicação intermitente de água. A equação 6 representa a infiltração acumulada durante o primeiro pulso, e a equação 7 representa a infiltração acumulada para os pulsos subseqüentes, sofrendo modificações para compensar o efeito da aplicação intermitente de água na porção já umedecida pelo pulso anterior:

$$Z = k \cdot t^a + Vib \cdot t + S \quad (6)$$

$$Z_s = \left(\frac{x}{x_a} \right)^\lambda \cdot \left(k \cdot t_s^a + Vib \cdot t_s + S - F_s \cdot t_s \right) + F_s \cdot t_s, \quad \text{para } x < x_a \quad (7)$$

em que:

S - representa a lâmina de água que fica armazenada na superfície do solo após a fase de avanço, L;

- Z_s - infiltração acumulada em cada pulso individual na região previamente molhada, $L^3 L^{-1}$;
- t_s - tempo de oportunidade de infiltração durante cada pulso, T;
- x_a - avanço da água no pulso anterior, L;
- x - distância da seção de aplicação até x_a , onde se quer determinar a infiltração, L;
- λ - parâmetro adimensional, o qual representa o efeito da aplicação intermitente de acordo com o grau de umedecimento do solo;
- F_s - velocidade de infiltração constante na irrigação intermitente, $L^3 T^{-1} L^{-1}$.

Walker e Humpherys (1983) comentaram que, na irrigação por sulcos onde a vazão é relativamente constante de um pulso para outro, a infiltração pode ser avaliada por duas equações do tipo Kostiakov-Lewis:

$$Z_c = k \cdot t^a + Vib \cdot t \quad (8)$$

$$Z_i = k' \cdot t^{a'} + Vib' \cdot t \quad (9)$$

em que:

- Z_c - infiltração acumulada para condição de aplicação contínua, $L^3 L^{-1}$;
- Z_i - infiltração acumulada para condição de aplicação intermitente, $L^3 L^{-1}$;
- k' , a' - parâmetros empíricos referentes a cada tipo de solo para condição de aplicação intermitente;
- Vib' - velocidade de infiltração básica para condição de aplicação intermitente, $L^3 T^{-1} L^{-1}$.

Os mesmos autores recomendam o uso da equação 8 para condição de primeiro pulso e da equação 9 para condição de terceiro e sucessivos pulsos, e concluíram ainda que, de acordo com observações de campo as características de infiltração de água no solo para condição de segundo pulso podem ser representadas por uma função de infiltração média entre as equações 8 e 9.

Strelkoff e Souza (1984), baseando-se na hipótese de que a velocidade de infiltração em sulcos de irrigação era linearmente relacionada com o perímetro molhado, desenvolveram um procedimento para computar a lâmina infiltrada como função do perímetro molhado local, obtendo-se a seguinte equação:

$$V_z = \zeta(t) \cdot WP \quad (10)$$

em que:

V_z - volume infiltrado, $L^3 L^{-1}$;

$\zeta(t)$ - função de infiltração, $L^3 L^{-2}$;

WP - perímetro molhado, L .

A infiltração (ζ) representa o volume por unidade de comprimento, por unidade do perímetro molhado, e pode ser obtida por uma equação semelhante à equação 5, ajustando os parâmetros a e k para esta condição.

Schwankl e Wallender (1988) estudaram o efeito na infiltração de água no solo utilizando a equação 5 e a equação 10, empregando o modelo Zero-Inércia. Os autores concluíram que, quando não se considerou a variação do perímetro molhado (equação 5), os tempos de avanço e, conseqüentemente, a distribuição de água infiltrada foram superestimados. O mesmo foi verificado por Bautista e Wallender (1993b), que, estudando diversas equações de infiltração em função do perímetro molhado, obtiveram, em todas as equações utilizadas, um melhor ajuste quando comparadas com a equação 5.

Devido a grande dificuldade de se obter as características de infiltração de água no solo, diretamente no campo, essas podem ser determinadas indiretamente por meio de simulações. Partindo do princípio de que os dados de avanço da água no solo são facilmente medidos no campo, é possível simular os parâmetros da equação de infiltração a partir desses dados de avanço. Segundo Bautista e Wallender (1993 a), essa solução é possível apenas quando se consideram equações do tipo Kostiakov (equação 4) e Philip, obtendo, dessa maneira, valores compatíveis com aqueles determinados no campo.

Existem diversos modelos matemáticos que, independentes do grau de simplificações, simulam o escoamento de água sobre a superfície do solo. Dos modelos existentes, destacam-se o Hidrodinâmico, o Zero-Inércia, o Onda Cinemática e o Balanço Volumétrico (Fangmeier e Strelkoff, 1979; Souza, 1981; Walker e Skogerboe, 1984; Schmitz e Seus, 1990; Azevedo, 1991). O modelo Hidrodinâmico é o que apresenta maior grau de complexidade, tornando-se mais rigoroso por empregar as soluções numéricas das equações da continuidade

(equação 11) e da quantidade de movimento ou energia (equação 12), denominadas equações de Saint-Venant, na forma

original (Walker e Skogerboe, 1984):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} = -\frac{\partial Z}{\partial t} = -i \quad (11)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f + \frac{c'vi}{gA} \quad (12)$$

em que:

A - área da seção transversal de escoamento, L²;

t - tempo acumulado, T;

v - velocidade média de escoamento, L T⁻¹;

x - distância a partir da seção de aplicação, L;

Z - volume infiltrado acumulado, L³ L⁻¹;

i - volume infiltrado no tempo, L³ T⁻¹ L⁻¹;

g - aceleração da gravidade, L T⁻² (9,81 m s⁻²)

y - profundidade de escoamento, L;

S_o - declividade longitudinal média da base de escoamento, L L⁻¹ ;

S_f - declividade da linha de energia, L L⁻¹;

C' - constante numérica resultante da derivação, no uso do princípio da conservação da quantidade de movimento ou da energia, adimensional.

As equações 11 e 12 são do tipo diferencial parcial de primeira ordem, unidimensional, não-linear e hiperbólica. Os dois primeiros termos da equação da quantidade de movimento (equação 2.13) são conhecidos como termos de aceleração e o último termo do segundo membro da equação é denominado infiltração dinâmica (SHAFIQUE, 1984).

Por envolver por completo as equações de Saint-Venant, a resolução das equações pelo modelo Hidrodinâmico requer um programa computacional relativamente complicado, com muitas variáveis, tornando-o de solução mais difícil (Rayej e Wallender, 1985). Um outro modelo bastante utilizado é o Zero-Inércia, desenvolvido por Strelkoff e Katapodes (1977), para irrigação por faixas, que propuseram uma simplificação na equação da energia com base na hipótese de que a aceleração da água pode ser considerada nula. Dessa forma, os termos de

aceleração $(\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x})$ e a infiltração dinâmica $(\frac{c'vi}{gA})$ são retirados da equação 12,

que fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad (13)$$

As equações 12 e 13 constituem o modelo matemático denominado Zero-Inércia.

Estudos posteriores mostraram que o modelo simula satisfatoriamente a irrigação por faixas e bacias. No caso de irrigação por sulcos, o modelo foi também utilizado, porém levando em consideração a geometria de escoamento, que é função da lâmina, do perímetro molhado e da área da seção transversal (Elliott et al., 1982; Schmitz e Seus, 1990).

Rayej e Wallender (1985) afirmaram que o modelo Zero-Inércia descreve com maior precisão a irrigação por sulcos, quando comparado com os modelos Onda Cinemática e Balanço Volumétrico, principalmente quando a declividade longitudinal da superfície se aproxima de zero. Esse fenômeno ocorre porque o gradiente de pressão hidrostática, uma força que promove o escoamento, está ausente na equação da energia nos modelos Onda Cinemática e Balanço Volumétrico.

O desempenho dos modelos é avaliado pela comprovação das soluções obtidas com dados de campo. Souza (1984), simulando a fase de avanço e de recessão pelos modelos hidrodinâmico e Zero-Inércia em irrigação por sulcos e utilizando dados obtidos em um campo com dimensões e geometria controladas, não encontrou diferenças entre os modelos, comprovando a validade do modelo Zero-Inércia na irrigação por sulcos. Segundo o autor, uma versão linearizada do modelo Zero-Inércia deve ser considerada, tendo em vista a redução do tempo de computação.

Carvalho (1994) apresenta um procedimento para simular a infiltração da água no solo com aplicação intermitente com base no modelo Zero-Inércia. Reescrevendo as equações da continuidade em sua forma completa (equação 14) e da quantidade de movimento com algumas substituições provenientes da equação de Manning e a forma da seção transversal em sulcos (equação 15) apresentada por Souza (1981),

encontraram as equações base do modelo Zero-Inércia para a irrigação por sulcos, que são resolvidas numericamente usando incrementos finitos num plano x-t.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

em que:

Q – vazão que entra no sulco, $L^3 T^{-1}$.

$$\frac{\partial(b \cdot A^h)}{\partial x} = S_o - \frac{Q^2 \cdot n^2}{d \cdot A^f} \quad (15)$$

em que:

b e h – são parâmetros empíricos da equação de Souza (1981);

n – coeficiente de rugosidade de Manning;

R – raio hidráulico, L

D e f – são parâmetros empíricos, constantes para um dado sulco.

Neste trabalho não serão apresentados os procedimentos para se chegar nos modelos das equações 14 e 15 para as fases de avanço, reposição, depleção e recessão, devido a complexidade das suas determinações. Entretanto, pela Figura 3, observa-se que a cada novo incremento de tempo, a frente de avanço se desloca ao longo do sulco, formando uma série de perfis superficiais e de infiltração. Cada perfil de infiltração ocorrido entre dois incrementos de tempo, formam uma célula (Figura 4), que se move a jusante a cada volume adicionado, sendo do tipo lagrangeano. Observa-se que a célula da ponta esquerda apresenta-se de forma diferenciada das outras células, com isso o equacionamento desta célula é diferenciado em relação às células do interior da frente de avanço. A célula da ponta direita também apresenta o equacionamento diferenciado, pois a sua forma também é diferenciada das outras. Além disso, o escoamento nesta célula é altamente não-linear e as magnitudes da área de escoamento e o perfil de água superficial varia drasticamente quando comparados com as outras células. A diferença fundamental entre a simulação dos parâmetros k e a da equação de Kostikov na irrigação intermitente pelo modelo Zero-Inércia é a necessidade de se fornecer mais de uma série de dados de avanço, obtendo dessa maneira parâmetros (k e a) para cada pulso de irrigação. Outra diferença é que se torna necessário o fornecimento de dois

coeficientes de Manning, sendo o primeiro representando as condições de rugosidade antes da irrigação e o segundo, as condições de rugosidade do solo já umedecido pelos pulsos anteriores.

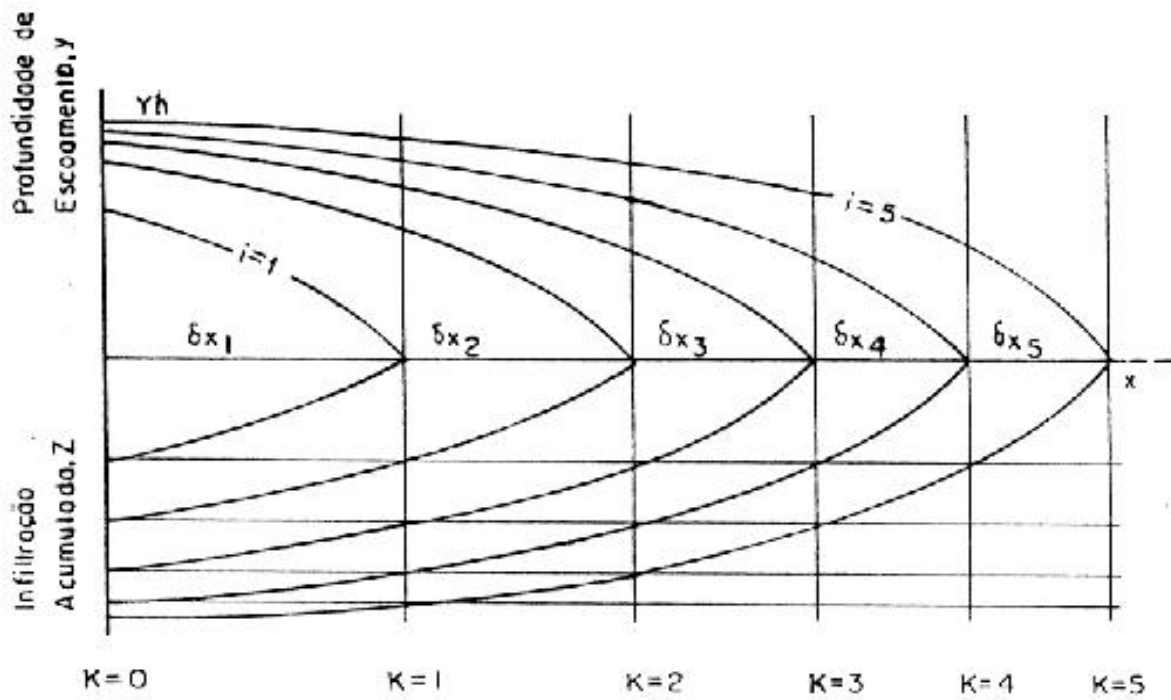


Figura 3. Esquema da progressão do escoamento superficial e da infiltração para intervalos de tempo constante (Walker e Skogerboe, 1984).

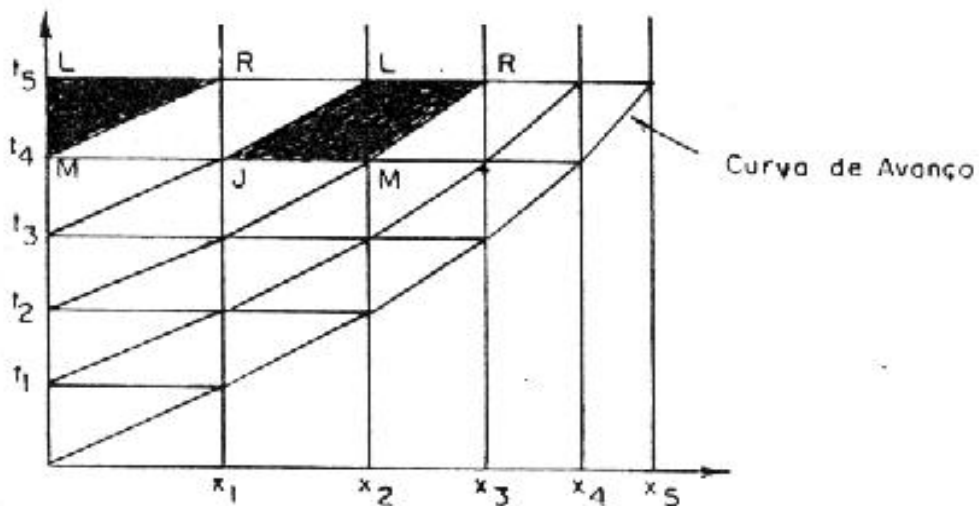


Figura 4. Sistema de grade no plano x-t, no modelo Zero-Inércia, durante a fase de avanço (Walker e Skogerboe, 1984).

Na simulação do avanço da água no solo na irrigação intermitente, são necessárias, no mínimo três equações de infiltração, referentes a cada pulso de irrigação. Com base na Figura 5, é possível verificar que, quando se deseja simular o avanço referente ao primeiro pulso da irrigação com aplicação intermitente, a equação de infiltração é a mesma para toda a grade computacional e refere-se a primeira equação (k_1 , a_1). Porém, para a simulação do segundo pulso, os valores de k e a utilizados no início do cálculo são aqueles referentes à segunda equação de infiltração (k_2 , a_2). Quando essa segunda frente de avanço atinge a porção seca do solo, é novamente válida a primeira equação de infiltração, e assim sucessivamente.

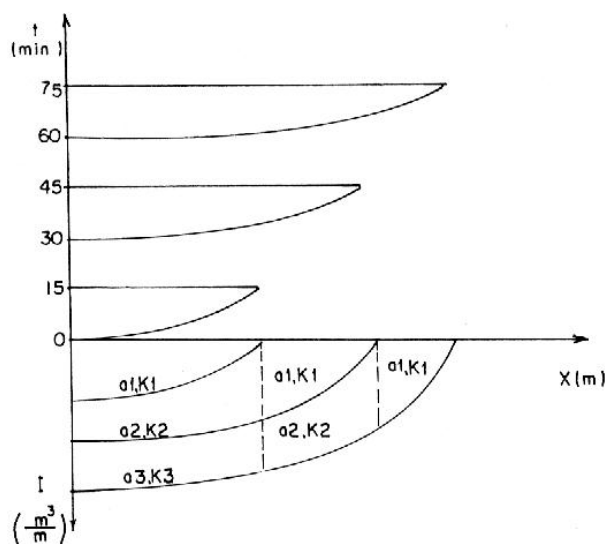


Figura 5. Ilustração da simulação da fase de avanço em função das equações de infiltração, para cada pulso da irrigação com aplicação intermitente de água (Carvalho, 1994).

O final da fase de avanço é marcado pelo início da fase de reposição ou armazenamento, na qual o número de células é fixo. A partir deste momento, o sistema lagrangeano de células oblíquas na grade do plano $x-t$ é trocado pelo sistema euleriano de células retangulares (Figura 6). Com isso o esquema matemático do modelo sofre algumas mudanças. Entretanto, se a vazão de entrada for suprimida antes da frente de avanço atingir o final do sulco, a fase de reposição não existe. Nas fases de depleção e recessão o modelo utiliza as mesmas equações utilizadas na fase de reposição.

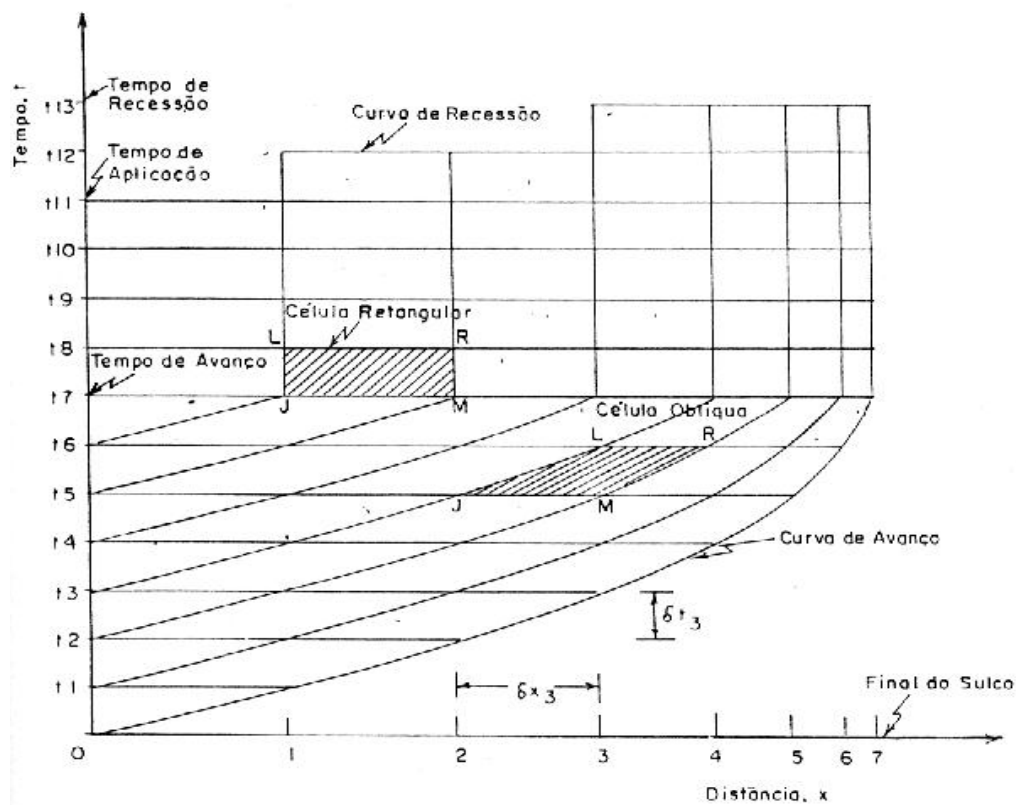


Figura 6. Grade computacional com os sistemas lagrangeano e euleriano, no plano x-t, para todas as fases da irrigação (Carvalho, 1994).

Carvalho (1994), simulando a fase de avanço e a infiltração de água no solo para a irrigação intermitente utilizando um programa computacional desenvolvido a partir do modelo Zero-Inércia e comparando com o programa SIRMOD, desenvolvido na Utah State University, que utiliza o modelo hidrodinâmico, que como dito anteriormente, é considerado padrão e dados medidos no campo, verificou que:

1. É necessário considerar a velocidade de infiltração básica (V_{ib}) na equação de Kostiakov, para sulcos de comprimentos longos, que exigem grandes tempos de avanço;
2. Praticamente não houve diferença entre os dados simulados pelos modelos e os dados medidos no campo, para o primeiro e terceiro pulso;
3. No segundo pulso, os dados simulados pelo SIRMOD, não representaram bem os dados de campo, devido ao programa utilizar uma equação de infiltração média das condições do primeiro e terceiro pulso;

4. O programa utilizado com base no modelo Zero-Inércia representou **muito bem** os dados de campo em todas as situações;
5. O modelo simulou de maneira satisfatória os parâmetros de infiltração de água no solo, a partir dos dados de avanço da água ao longo da superfície do solo.

6. O PAPEL DA HISTERESE E DA REDISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NA APLICAÇÃO INTERMITENTE

Conforme Izadi et al. (1990), a histerese na relação entre o teor de água e a pressão de vapor no solo é uma das causas que permitem uma taxa de avanço mais rápida na aplicação intermitente. Outra causa, segundo Levin et al. (1979) seria a redistribuição de água durante o tempo em que a água está cortada, o que implica na diminuição no gradiente hidráulico na camada superficial do solo a cada ciclo de intermitência.

Para prever a histerese várias teorias foram desenvolvidas (Iwata et al.), sendo a mais aceita a teoria do domínio dependente proposta por Mualem em 1973. O modelo de Mualem tem as seguintes vantagens: uma relação histerética de umidade para pressão de vapor é desenvolvida a partir das curvas principais de umedecimento e secagem; as curvas de ligação são definidas em uma forma analítica; todas as curvas de ligação caem dentro de uma curva principal; o modelo pode ser facilmente adotados para estudos numéricos de fluxo insaturado em meio porosos (Izadi et al., 1990).

Mualem melhorou seu modelo de 1973 incluindo uma contribuição regressiva do volume de poros para os processos histeréticos. O modelo computa para entrada de ar e prevê as relações de pressão de vapor e umidade na região entre as primeiras curvas principais de secamento e umedecimento. Mualem & Dagan (1975) introduziram um modelo de domínio dependente, já que os modelos anteriores não tinham acurácia para solos com distribuição de poros estreitos. O modelo do domínio dependente computa para efeito de bloqueio dos poros contra a entrada de ar durante os processos de secagem. Porém, tem a desvantagem de requerer dados para uma curvas primária de ligação de umedecimento e secagem, assim com os dados para curva principal. O modelo do domínio dependente, de Mualem, superou

essa desvantagem e provou ser comparável ao complexo modelo de 1975 (Izadi et al., 1990).

Simulando as aplicações intermitente e contínua de água, mediante um modelo numérico para infiltração unidimensional baseado na equação de Richard, e considerando a histerese a partir do algoritmo de Mualem, Izadi et al.(1990) comprovaram que na presença da histerese tem-se menor profundidade de penetração da água, sendo a posição da frente de molhamento significativamente alterada. Os mesmos autores comprovaram os resultados de Samani, verificando que a redistribuição não é uma causa para a taxa de avanço mais rápida na irrigação intermitente. Concluíram Izadi et al.(1990) que a histerese causa uma diminuição na infiltração acumulada quando comparada à redistribuição apenas, porém, a combinação da histerese e da redistribuição não foi uma causa para o benefício da intermitência.

Dentre as diversas causas que podem provocar a histerese, tem-se como principais (Klar, 1988):

1. O ângulo de contato entre a água e as partículas sólidas (θ) - esse ângulo modifica o menisco e é maior para um líquido avançando sobre um sólido (molhamento), do que para um sólido em estágio de secamento.
2. Desuniformidade geométrica dos poros – devido aos efeitos da capilaridade num determinado volume de solo os poros maiores podem não ser ocupados pela água no processo de molhamento, sendo assim maior o teor de água no solo sob secamento.
3. Poros bloqueados – um solo em molhamento apresenta ar nos poros e a água ao penetrar no solo seco expulsa bolhas de ar que permanecem dentro dos macroporos e mesmo após algum tempo ainda haverá ar, não atingindo os mesmos valores de umidade de um solo em secamento sob o mesmo potencial.
4. Sucessão de secamentos e molhamentos - A contração e expansão das argilas afetam o tamanho dos poros e a densidade do solo. Ambos os fatores alteram a q volumétrica em um dado y hídrico. A contração e expansão freqüentemente são lentas, principalmente na presença de matéria orgânica, dificultando as considerações sobre a histerese, a qual envolve mudanças permanentes e semipermanentes no meio poroso.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMI, M.H.; GOLDHAMER, D.A. Surge Irrigation Optimization Model. **Transactions of the ASAE**. 31 (2): 519-526, 1988.
- AZEVEDO, C.A.V. **Real-time Solution of the inverse furrow advance problem**. Logan, Utah State University, 263 p. 1991. (Tese Ph.D.).
- AZEVEDO, M.A.S.B. **Estudo das características de avanço da água em sulcos, num solo Aluvial Eutrófico, para os escoamentos contínuos e intermitente**. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1989. 105 p. (Dissertação M.S.).
- BAUTISTA, E.; WALLENDER, W.W. Identification of Furrow Intake Parameters from Advance Times and Rates. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, 119 (2): 295-311, 1993a.
- BAUTISTA, E.; WALLENDER, W.W. Numerical Calculation of Infiltration in Furrow Irrigation Simulation Models. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, 119 (2): 286-294, 1993b.
- BAUTISTA, E.; WALLENDER, W.W. Spatial Variability of Infiltration in Furrow. **Transactions of the ASAE**, 28 (6): 1846-1851, 1985.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa, MG, UFV/ Impr. Univ., 1989, 596p.
- BISHOP, A.A.; WALKER, W.R.; ALLEN, N.L.; POOLE, G.J. Furrow advances rates under surge flow systems. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, 107 (3): 257-264, 1981.
- BLAIR, A.W.; SMERDON, E.T. Modeling Surge Irrigation Infiltration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, 113 (4): 497-515, 1987.
- CARVALHO, D.F. **Simulação da infiltração de água no solo e da irrigação por superfície, com aplicação intermitente, utilizando o modelo Zero-Inércia**. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1991. 83p. (Dissertação M.S.)

- CLEMMENS, A.J. Verification of the Zero-Inertia Model for Border Irrigation. **Transactions of the ASAE**. 22 (6): 1306-1309, 1979.
- COOLIDGE, P.S.; WALKER, W.R.; BISHOP, A.A. Advance and run-off surge flow furrow irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. ASCE, 108 (1): 35-42, 1982.
- ELLIOTT, R.L.; WALKER, W.R. Field Evaluation of Furrow Infiltration and Advance Functions. **Transactions of the ASAE**. 25 (2): 396-400, 1982.
- ELLIOTT, R.L.; WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V. Zero-Inertia Modeling of Furrow Irrigation Advance. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 108 (3):179-195, 1982.
- FANGMEIER, D.D.; STRELKOFF, T. Mathematical Models and Border Irrigation Design. **Transactions of the ASAE**, 22 (1): 93-99, 1979.
- GARRIDO, M.A.T. **Influência do regime de fluxo sobre infiltração e avanço de água em sulcos de irrigação**. Lavras, MG, ESAL, Impr. Univ, 1992. 92 p. (Tese M.S.).
- GOLDHAMER, D.A; ALEMI, M.H.; PHENE, R.C. Surge vs. continuous flow irrigation. **California Agriculture**, 41 (5) : 29-32, 1987.
- HOLZAPFEL, E.A.; MARIÑO, M.A.; VALENZUELA, A.; DIAZ, F. Comparison of Infiltration Measuring Methods for Surface Irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. ASCE 114(1): 130-142, 1988.
- IZADI, B.; HEERMANN, D.F.; KLUTE, A. The role of redistribution and hysteresis in the surge irrigation phenomena. **Transactions of the ASAE**, 33 (3), 1990.
- IZUNO, F.T.; PODMORE, T.H.; DUKE, H.R. Infiltration under surge irrigation. **Transactions of the ASAE**, 28 (2): 517-521, 1985a.
- IZUNO, F.T.; PODMORE, T.H.; DUKE, H.R. Infiltration under surge flow irrigation. **Transactions of the ASAE**, 28 (3): 821-829, 1985b.

- IWATA, S.; TABUCHI, T.; WARKENTIN, B.P. Soil-water interactions: mechanisms and applications. Nova York: Marcel Dekker, 1995. 440 p.
- KEMPER, W.D.; TROUT, T.J.; HUMPHERYS, A.S.; BULLOCK, M.S. Mechanisms by Which Surge Irrigation Reduces Furrow Infiltration Rates in a Silty Loam Soil. **Transaction of the ASAE**, 31 (3): 82 1-829, 1988.
- KILLEN, MA.; SLACK, D.C. Green-Ampt - Model to Predict Surge Irrigation Phenomena. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 113 (4): 575-584, 1987.
- KLAR, A.E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo: Nobel. 2ed., p.57-111. 1988.
- LEVIN, I.; VAN ROOYEN, P.C.; VAN ROOYEN, F.C. The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution pattern. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 43 (1), p. 8-16, 1979.
- MUALEM, Y. Modified approach to capillary hysteresis based on a similarity hypothesis. **Water Resources Res.** 9(5):1324-1331, 1973.
- MUALEM, Y. A conceptual model of hysteresis. **Water Resources Res.** 10(3):514-520, 1974.
- MUALEM, Y.; DAGAN, G. A dependent domain model of capillary hysteresis. **Water Resources Res.** 11(3):452-460, 1975.
- MUALEM, Y. A modified dependent-domain theory of hysteresis. **Soil Science.** 9(5):283-291, 1984.
- McCORNICK, P.G.; DUKE, H.R.; PODMORE, T.H. Field Evaluation Procedure for Surge Irrigation. **Transaction of the ASAE**, 31 (1): 168-176, 1988.
- OLIVEIRA, J.L.B. **Modelo Computacional. para Determinação dos Parâmetros da Infiltração de Água no Solo, Utilizando o Princípio do Modelo Zero--Inércia.** Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1994. (Tese D.S.).

- PEREIRA, G.M. **Estudo das características de avanço e infiltração da água em sulcos, em um latossolo vermelho-escuro álico, com aplicação de água contínua e intermitente.** Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1991. 84p. (Dissertação M.S.)
- RAYEJ, M.; WALLENDER, W.W. Furrow Irrigation Simulation Time Reduction. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 111 (2): 134-146, 1985.
- RUGGIERO, M.A.G.; LOPES, V.L.R. **Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais.** São Paulo, McGraw-Hill, 1988, 295 p.
- SAMANI, Z.A.; WALKER, W.R.; WILLARDSON, L.S. Infiltration under surge flow irrigation. **Transactions of the ASAE**, 28 (5): 1539-1542, 1985.
- SCHMITZ, G.H.; SEUS, G.J. Mathematical Zero-Inertia Modeling of Surface Irrigation: Advance in Furrows. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 118 (1): 1-18, 1990.
- SCHWANKL, L.J.; WALLENDER, W.W. Zero Inertia Furrow with Variable Infiltration and Hydraulic Characteristics. **Transactions of the ASAE**, 31 (5): 1470-1475, 1988.
- SHAFIQUE, M.S. **Zero-Inertia model for basin-furrow irrigation.** Fort Collins, Colorado State University, 1984. 267p. (Tese Ph.D.).
- SOARES, A.A. **Irrigação por sulco com aplicação de água intermitente.** Prova de Erudição - Concurso Professor Titular, Viçosa, MG. UFV, 1992a. 15 p.
- SOARES, A.A. **Irrigação por Superfície.** Brasília, ABEAS, 1992b. 71 p. (Apostila).
- SOUZA, F. **Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation.** Davis, University of California, 1981. 1972p. (Tese Ph.D.).
- SOUZA, F. Modelo Matemático da Irrigação por Sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 19 (9): 1135-1143, 1984.

- STRELKOFF, T.; KATAPODES, N.D. Border Irrigation hydraulics with Zero-Inertia. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 103 (3): 325-342, 1977.
- STRELKOFF, T.; SOUZA, F. Modeling Effect of Depth on Furrow Irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 110 (4) : 375-387, 1984.
- TESTEZLAF, R. Fluxo intermitente: uma nova idéia em irrigação superficial. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, 24: 2-3, 1986.
- TESTEZLAF, R; GARTON, J.E. Sistema automático de irrigação por sulcos através de canal aberto sob condições de fluxo intermitente. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, 29: 31-35, 1987.
- TESTEZLAF, R.; ELLIOTT, R.L.; GARTON, J.E. Furrow infiltration under surge flow irrigation. **Transactions of the ASAE**, 30 (1):193-197, 1987.
- WALKER, W.R.; HUMPHERYS, A.S. Kinematic-Wave Furrow Irrigation Model. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, 109 (4): 377-392, 1983.
- WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V. **The theory and practice of surface irrigation: a guide for study in surface irrigation engineering**. Logan, Utah, 1984. 470 p.
- WALLENDER, W.W.; RAYEJ, M. Zero-Inertia Surge Model with Wet-Dry Advance. **Transaction of the ASAE**, 28 (5): 1530-1534, 1985.
- ZANON, E.R.; SOARES, A.A.; COUTO, L.; GOMIDE, R.L. Estudo das características de avanço da água em sulcos, em dois tipos de solo com aplicação de água contínua e intermitente. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 22, Ilhéus, 1993. Anais... Ilhéus, SBEA, CEPLAC, 1993. v. 4, p. 2667-2677.